

文章编号:1005-0523(2019)02-0008-07

# CGMM 加固钢筋混凝土圆柱的拟静力试验研究

徐 聪<sup>1</sup>, 陈建兵<sup>1</sup>, 李 响<sup>2</sup>

(1.苏州科技大学土木工程学院,江苏 苏州 215011;2.中交一公局第二工程有限公司,江苏 苏州 215011)

**摘要:**钢筋混凝土柱是结构的主要承重构件,为更有效提高试件的抗震加固效率,提出采用不同高度的水泥基灌浆料及钢丝网(CGMM)加固思路。试验制作3根钢筋混凝土圆柱进行低周反复加载,主要介绍了试验过程,分析研究各试件破坏机理、滞回性能、延性、耗能能力及刚度退化。试验结果表明:CPRP1,CPRP2试件较CP试件抗震能力有显著提高;加固高度不同的试件,随CGMM加固层的增高,试件峰值荷载、延性、耗能均增大,刚度退化减缓。

**关键词:**水泥基灌浆料及钢丝网;加固高度;低周反复试验;滞回曲线;抗震性能

**中图分类号:**TU375.3;TU376

**文献标志码:**A

钢筋混凝土柱是结构中承受竖向荷载及侧向力的重要构件,大量震害调查表明<sup>[1-2]</sup>,因设计和构造方面的缺陷、施工质量的优劣等因素<sup>[3]</sup>,随着工作时间的累积均会造成其普遍缺乏足够的抗震性能。在地震作用下,其局部的缺陷将会导致结构的破坏,对社会的政治、经济、民生产生重大的影响;因此,针对地震作用下钢筋混凝土柱局部性能不足的现象,采取围箍式的加固方式来维持甚至提高其抗震性能。根据文献[4-5]可知,运用钢筋网高性能复合砂浆、粘贴钢板、CFRP纤维等材料对试件进行加固,均能够使其恢复或超过原本的抗震性能。

水泥基灌浆料是一种具有高附着力和低收缩率的粉状材料,使用时只需按配合比加水搅拌即可满足施工控制要求,李祖辉<sup>[6]</sup>、王剑锋<sup>[7]</sup>、张可<sup>[8]</sup>等人对水泥基灌浆料加固混凝土试件的抗弯抗剪等性能进行了静力试验研究,研究表明,采用围箍式水泥基灌浆料的加固方式能够有效地改善试件的力学性能。根据以上思路,提出采用水泥基灌浆料及钢丝网(cement-based grouting material with steel wire mesh,CGMM)加固钢筋混凝土圆柱的方法,以钢丝网为增强材料,以高性能水泥基灌浆料为基相组成的CGMM薄层加固材料具有较好的耐火性和耐久性,截面尺寸增加不大,便于施工,且CGMM层与柱身混凝土高度黏结,表现出更好的工作协调性。基于上述CGMM加固材料的优势和特点,采用拟静力试验方案,分析各试件的破坏特征、承载力、延性、耗能能力及刚度退化等。介于试验现有条件的限制,本文仅分析不同加固高度对试件抗震性能的影响。

## 1 试验研究

### 1.1 试件设计

根据某实际匝道独立桥墩的各参数,按1/3的相似比制作了3根钢筋混凝土柱,缩尺模型柱身直径为350 mm的圆形截面,高1 400 mm。试件浇筑混凝土选用C30强度等级,柱身纵筋选用8根直径14 mm的

收稿日期:2018-10-29

基金项目:苏州市市级建设科研项目(苏住建科[2018]6号);苏州科技大学科研创新计划项目(SKCX17-022)

作者简介:徐聪(1994—),男,硕士研究生,研究方向为桥梁工程。

通讯作者:陈建兵(1968—),男,教授,研究方向为桥梁工程。

HRB335 钢筋均匀分布于柱身,箍筋为直径 6 mm 的 HPB300 钢筋且以 80 mm 的间距分布柱身,盖帽及基座配筋均按构造要求。其中 2 个试件凿去厚度约为 25 mm,高度分别为 350,700 mm 的保护层,露出柱身箍筋后分别采用 CGMM 材料加固,加固厚度为 45 mm。根据不同的加固高度,试件分别名为:CP,CPRP1,CPRP2。CP 试件为原试件,CPRP1 试件采用 CGMM 加固 350 mm,CPRP2 试件采用 CGMM 加固 700 mm,试件的详细尺寸、配筋见图 1 所示。

加固材料水泥基灌浆料由江苏尼高建科有限公司生产,产品型号:JNK-T101,采用推荐配合比灌浆料:水=100:15 配置;镀锌焊接钢丝网孔径为 15 mm×15 mm,单根直径为 0.8 mm。水泥基灌浆料、钢丝网、混凝土及钢筋均取试件制作同一批次进行力学实验,各材料性能结果见表 1 所示。

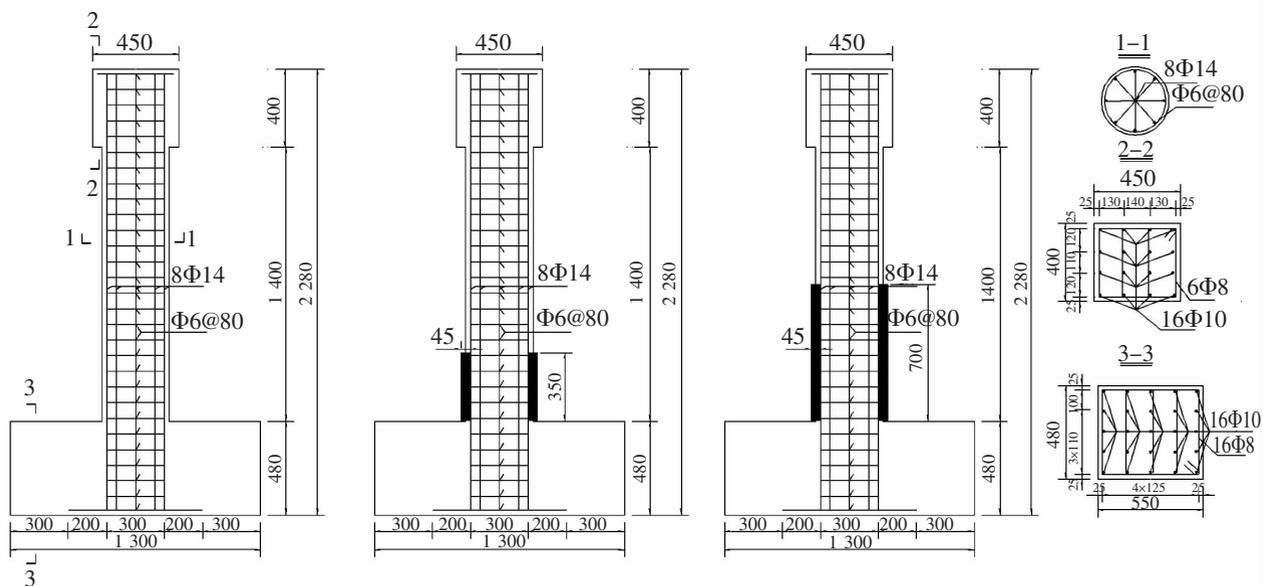


图 1 试件尺寸及配筋详图(单位:mm)

Fig.1 Dimensions of specimens and arrangement reinforcement(Unit:mm)

表 1 试件材料信息

Tab.1 Material information of specimens

MPa

混凝土立方体强度	纵筋屈服强度	箍筋屈服强度	水泥基灌浆料立方体强度	钢丝网屈服强度
29.7	412	344.55	69.4	312

## 1.2 加载方案

试件底部设计尺寸为 1 300 mm×550 mm×480 mm 的承台,用于试验时试件的固定,上部设计尺寸为 450 mm×450 mm×400 mm 的盖帽用于水平作动器及竖向千斤顶的加载。试验竖向荷载通过千斤顶加载至预定轴力 500 kN(轴压比为 0.3)并维持恒定;水平加载采用位移控制,在屈服前,试件的加载幅值为 2 mm,每级加载 1 次;当达到屈服位移后,加载幅值为 5 mm,每级循环加载 3 次;当循环中水平荷载的峰值下降至该试件极限荷载的 85%以下时停止加载。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试件破坏特征

1) CP 试件:在试验初期,试件处于弹性阶段;在位移达到约 4 mm 时,在柱身底部向上 40 mm 处出现第 1 条水平裂缝;当水平位移约为 9.2 mm 时,受拉纵筋开始屈服,表面混凝土的水平裂缝不断加宽并向两侧延伸。随着水平位移的继续增大,裂缝区域往试件柱身上部发展,已出现的裂缝宽度不断增大,新出现裂缝位置大部分位于旧裂缝延伸处;最后,裂缝相互贯通,柱身底部的混凝土压碎程度加剧并逐渐脱落;试件破

坏形态见图 2 所示。



(a) CP 试件裂缝



(b) CP 试件破坏

图 2 CP 试件破坏形态  
Fig.2 Failure mode of CP

2) CPRP1 试件:在位移达到 6 mm 时,CPRP1 试件出现裂缝,裂缝出现位置在试件柱身未加固区,位于柱身加固区顶端向上约 60 mm 处;当位移达到 10 mm 时,纵筋开始屈服,应变增长加快,裂缝增加且逐渐延伸;在水平位移达到约 15 mm 处,加固区开始出现水平裂缝,裂缝位置位于柱身加固与未加固交界处;在水平位移达到约 30 mm 时,加固区上缘出现竖向裂缝;在位移达到 35 mm 时,加固区水泥基灌浆料发生崩裂;试验加载后期,未加固区底端混凝土压碎程度加剧并逐渐脱落,加固区材料出现大宽度竖向裂缝,试件破坏明显,停止试验。试验过程中,柱身加固区与未加固区出现竖向裂缝可能因为在基座与加固区底部未预留缝隙,水平位移较大时,加固层直接承受轴向力而导致柱身底部会产生较大剪力<sup>[9]</sup>,试件破坏见图 3 所示。由图可以看出,CGMM 加固层仅外围发生破坏,钢丝网包裹核心水泥基灌浆料未出现破坏。



(a) CPRP1 试件裂缝



(b) CPRP1 试件破坏

图 3 CPRP1 试件破坏形态  
Fig.3 Failure mode of CPRP1

(3) CPRP2 试件:在加载初期,试件曲线趋势与 CP,CPRP1 基本一致;当水平位移达到约 10 mm 时,柱身出现水平裂缝,裂缝位置分别位于加固区处距加固区底部约 43 cm,未加固区处距加固区上缘约 10 cm 处,

试件进入开裂阶段;当水平位移达到约 10 mm, CPRP2 试件钢筋屈服;随着位移的增大,裂缝宽度加宽,加固区与未加固区不断出现新裂缝,裂缝产生位置主要位于未加固区底端;当位移达到 35 mm 时,柱身未加固区底端混凝土开始挤压破坏,加固区产生竖向裂缝;当试件未加固区混凝土脱落,加固区水泥基灌浆料崩裂,停止加载。试验过程中,柱身加固区产生竖向裂缝原因与 CPRP1 试件相同,试件试验图见图 4 所示。



(a) CPRP2 试件裂缝

(b) CPRP2 试件破坏

图 4 CPRP2 试件破坏形态  
Fig.4 Failure mode of CPRP2

## 2.2 试件滞回曲线

滞回曲线描述了试件从弹性、弹塑性到塑性直至破坏的全过程,是循环荷载作用下试件力学性能变化的综合反映<sup>[10]</sup>。由上述试验得到 CP, CPRP1, CPRP2 的荷载-位移曲线即滞回曲线如图 5 所示。

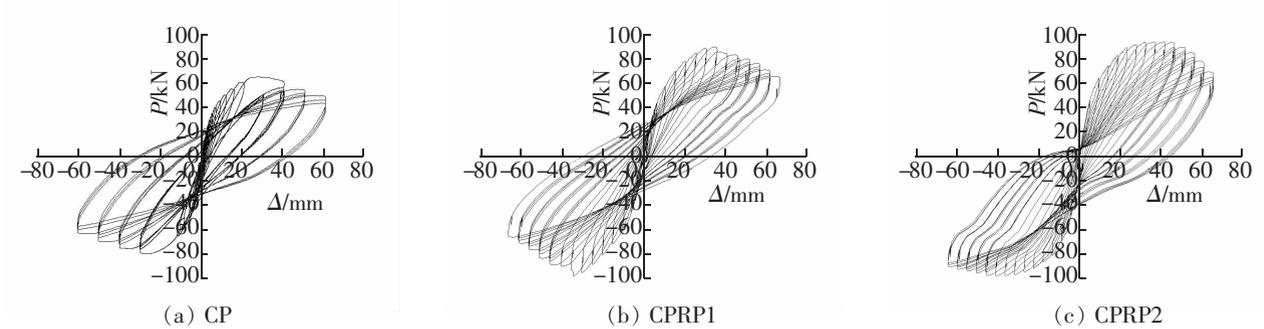


图 5 滞回曲线

Fig.5 Hysteretic curve

通过试件滞回曲线对比,可以得出:

- 1) 在屈服前,各试件均呈线性变化,试件的加、卸载刚度没有显著退化;
- 2) 达到屈服位移后,随水平位移的继续增大和循环次数的增加,试件承载力逐渐升高,曲线的斜率随水平位移的增大而减小;
- 3) 在达到峰值荷载后,各试件随水平位移和循环次数的增加,柱身表面裂缝不断开展、混凝土发生破坏导致试件工作性能的下降,承载力开始逐渐降低;
- 4) CP, CPRP1, CPRP2 的滞回曲线均存在捏缩<sup>[41]25</sup>。滞回曲线捏缩是由试件刚度退化引起的,其捏缩程度主要取决于混凝土裂缝的开展宽度、累积的受压残余变形、纵筋的伸长应变及钢筋与混凝土之间的粘结滑移。

### 2.3 试验结果分析

骨架曲线是指每次循环加载中达到的荷载最大值的连线<sup>[11]</sup>,根据图 5 的滞回曲线,得到 CP, CPRP1, CPRP2 的骨架曲线见图 6 所示。曲线能够反映试件在拟静力试验中承载力、刚度、延性等特性的变化,各阶段中的特征值见表 2。

#### 2.3.1 承载力及位移延性系数

承载力是试件抗震性能的直观表现,延性是表征结构变形能力的重要参数。由于混凝土是一种非匀质材料,在拟静力试验中,正、反两方向的力学性能不可能表现地完全相同,故采用正、反方向平均值计算各试件的参数,钢筋混凝土柱的位移延性系数通过式(1)来计算<sup>[12-13]</sup>。

$$\mu = \frac{|+\Delta_u| + |-\Delta_u|}{|+\Delta_y| + |-\Delta_y|} \quad (1)$$

式中:“+”表示正向加载;“-”表示反向加载; $\mu$  为位移延性系数; $\Delta_u$  为试件的极限位移,取当试件的承载能力降低至峰值荷载的 85%时相应位移值; $\Delta_y$  为试件的屈服位移,取首根纵向钢筋屈服时相应的位移值。

由试验结果计算得到各数据见表 2。

表 2 试验结果数据  
Tab.2 Test result data

试件	开裂荷载/ kN	屈服位移/ mm	峰值荷载		峰值位移/ mm	极限位移/ mm	位移延性系数	
			试验值/kN	提高率/%			试验值/kN	提高率/%
CP	25	9.2	75	-	25	40	4.3	-
CPRP1	43.3	10	95	26.7	35	54	5.4	25.6
CPRP2	62	10	98	30.7	40	60	6	39.5

由表 2 可知,CPRP1, CPRP2 试件承载力、混凝土开裂荷载、各阶段荷载位移及延性较 CP 试件均有不同程度的提高。沿柱身采用 CGMM 加固对可能出现塑性铰的区域施加了有效的横向约束,推迟受压区混凝土的压碎,由图 3(b)、图 4(b)可以看出,加固层外围水泥基灌浆料抵抗横向变形而产生崩裂,保证核心混凝土的受力状态,延缓试件的开裂,提高了试件的工作性能,从而使试件的延性得到显著改善。在 CPRP2 试件和 CPRP1 试件对比中发现,随加固高度的增加,CGMM 加固层对混凝土的约束作用越强,各参数计算值均有所提高。

#### 2.3.2 累计滞回耗能

滞回耗能是评价结构抗震性能的一个重要依据,耗能能力通过滞回曲线所包围面积的大小来衡量,耗能越大说明试件的抗震性能越好<sup>[14]</sup>。由试验所得到 CP, CPRP1, CPRP2 的滞回曲线通过式(2)进行积分计算,即可得到各试件每一级的滞回耗能。

$$E = \int_0^x F dx \quad (2)$$

基于上述计算方法,得到 CP, CPRP1 及 CPRP2 试件从开始加载至破坏时的累积耗能见图 7 所示。

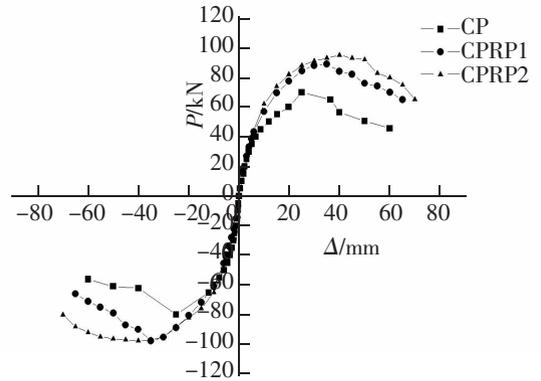


图 6 骨架曲线  
Fig.6 Skeleton curve

由图7可知,CP,CPRP1,CPRP2试件的累积耗能均随位移的增大而增加。CPRP1试件及CPRP2试件的滞回耗能相对于CP试件有一定提高。在位移达到60 mm时,CPRP1试件的累积耗能较CP试件提升了16.2%,CPRP2试件的累积耗能较CP试件提升了26.8%。可见,随着位移的增大和循环次数的不断增加,CGMM加固层的约束作用有效延缓了受压混凝土横向变形,改善了核心混凝土和纵向钢筋的受力性能,且随加固层高度的增加,试件具有更好的变形性能和耗能能力,CPRP2试件的累积耗能较CPRP1试件提升了9.1%。

### 2.3.3 刚度退化性能分析

在拟静力试验下,试件抗震能力下降的主要原因是刚度的退化,本文试件的刚度退化采用计算每次循环的割线刚度来反映,割线刚度由式(3)可得<sup>[15]</sup>,即

$$K_i = \frac{|P_i| + |-P_i|}{|\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (3)$$

式中: $K_i$ 为第*i*个控制位移下试件的割线刚度; $P_i$ 为对对应位移下首次循环的峰值荷载; $\Delta_i$ 为与峰值荷载相对应的位移值。计算结果见图8所示。

试件曲线形状均为逐渐下降段。其主要原因为:

1) 钢筋的非弹性性能: 屈服阶段的钢筋表现出包兴格效应<sup>[16]</sup>,应力-应变曲线在远低于初始屈服强度的应力时就表现出明显的非线性;

2) 混凝土的开裂程度: 混凝土裂缝的发展将会造成其受力性能的退化,从而导致试件刚度的退化。

由图8可知,较CP试件,CPRP1,CPRP2试件的割线刚度有一定提高,在位移幅值为60 mm时,CPRP1,CPRP2试件的割线刚度分别提高了29.1%,60.9%。CP试件在20~30 mm处存在刚度突减段,产生此现象的原因是因为钢筋的滑移效应及混凝土表面较宽裂缝的闭合从而导致位移增加较大,荷载增幅减小引起刚度急剧退化。可见,CGMM加固层对减缓试件刚度退化的贡献较大,对柱身混凝土的约束作用效果明显,有效遏制混凝土裂缝的发展,延缓纵向钢筋的变形;在加固试件的对比中发现,CPRP2试件的割线刚度较CPRP1提高了24.6%,随围箍式加固方式高度增加,试件的刚度退化曲线愈加平缓,更有利于在地震作用下保持试件的抗震性能。

## 3 结论

1) 在相同的试件尺寸、配筋率、长细比、轴压比等条件下,采用CGMM加固钢筋混凝土柱有效提高了试件的抗震性能,试验中CGMM加固层仅外围水泥基灌浆料发生破坏,钢丝网包裹核心水泥基灌浆料未出现明显破坏,延缓了受压混凝土横向变形,改善了试件的工作状态,CPRP1,CPRP2试件的峰值荷载、位移延性

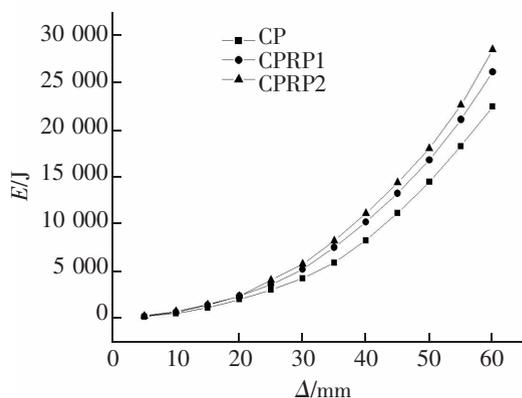


图7 累积滞回耗能

Fig.7 Cumulative hysteretic energy dissipation

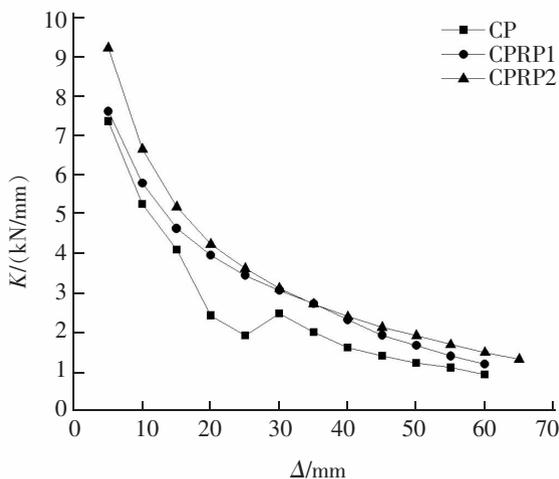


图8 刚度退化对比

Fig.8 Comparison of stiffness degradation

系数、累计耗能等均有明显提高,刚度退化减缓。

2) 在试验过程中,采用围箍式加固形式需在基座与加固层之间留有一定缝隙。随位移幅值的增大,CGMM加固层与基座会产生较大的剪切作用力,导致加固层及柱身出现竖向裂缝。

3) CGMM加固层高度是影响钢筋混凝土柱抗震性能的一个重要参数。随加固高度的增加,CGMM加固层对试件产生的横向约束增强,更能有效维持核心混凝土及纵向钢筋的工作性能,试件各抗震特征值均显著增加,从而有效提升了钢筋混凝土柱的抗震加固效率。

#### 参考文献:

- [1] PRIESTLEY M J N, SEIBLE F, CALVIL G M. Seismic design and retrofit of bridges[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1996.
- [2] 卓卫东, 范立础. 从震害教训中反思我国桥梁抗震设计现状[J]. 福州大学学报:自然科学版, 1999, 27(3): 7-10.
- [3] 陈水生, 刘珺, 桂水荣. 横系梁对双柱式高墩桥梁抗震性能的影响[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(4): 1-6.
- [4] 蒋隆敏. 钢筋网高性能水泥复合砂浆加固 RC 柱在静载与低周反复荷载作用下的性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [5] 卓卫东, 林荃冰, 刘丽玲, 等. 基于模型试验的 RC 墩柱抗震加固方法比较[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(4): 109-115.
- [6] 李祖辉. 混凝土结构加固水泥基灌浆料性能与工程应用研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2015.
- [7] 王剑锋. 新型混凝土材料加固钢筋混凝土梁、柱构件试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2010.
- [8] 张可, 熊进刚, 胡华章. 高性能灌浆料加固混凝土偏心受压柱的受力性能[J]. 南昌大学学报:工科版, 2018, 40(1): 35-40.
- [9] 王全凤, 郑济坤, 周博, 等. 基于滞回耗能的 HRBF500 RC 柱抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(11): 22-28.
- [10] 尚守平, 蒋隆敏, 张毛心. 钢筋网高性能复合砂浆加固钢筋混凝土方柱抗震性能的研究[J]. 建筑结构学报, 2006(4): 16-22.
- [11] 邱文建, 邵永健, 翁晓红, 等. 预制 V 型腹板 PSRC 梁的拟静力试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(7): 58-62.
- [12] 李斌, 高春彦. 矩形钢管混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2007, 24(S2): 177-181.
- [13] 朱美春, 刘建新, 土清湘. 钢管一方钢管高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(7): 55-63.
- [14] 沈聚敏, 周锡元. 抗震工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 164-168.
- [15] 刘伯权, 白国良, 张国军. 高轴压比高强混凝土框架柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 45-50.
- [16] 李学平, 吕西林, 郭少春. 反复荷载下矩形钢管混凝土柱的抗震性能 II: 分析研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005(5): 106-113.

## Pseudo Static Experiment of Reinforced Concrete Circular Columns Strengthened with CGMM

Xu Cong<sup>1</sup>, Chen Jianbing<sup>1</sup>, Li Xiang<sup>2</sup>

(1.School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China;

2.CCCC First Highway No.2 Engineering CO.,LTD., Suzhou 215011, China)

**Abstract:** Reinforced concrete columns are the main load-bearing component of the structure. In order to enhance more efficiently the seismic behavior of reinforced concrete columns, a method to strengthen column by using different height of cement-based grouting material with steel wire mesh (CGMM) was proposed. Three reinforced concrete columns were tested under low reversed cyclic loading and the process of tests was introduced. Failure mechanism, hysteretic behavior, ductility, cumulative energy dissipation and stiffness degradation of specimens were analyzed. The experimental results showed that the seismic performances of CPRP1 and CPRP2 specimens were significantly higher than that of CP specimen. In the columns of different strengthened height, with the increase of CGMM strengthened layer, the peak load, ductility and energy dissipation of specimen increased and the stiffness degradation became less rapid.

**Key words:** cement-based grouting material with steel wire mesh; height of reinforcement; low reversed cyclic loading; hysteretic curve; seismic behavior